МАССОВАЯ РАДИО-БИБЛИОТЕКА

С. Н. КРИЗЕ

РАСЧЕТ МАЛОМОЩНЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ДРОССЕЛЕЙ ФИЛЬТРОВ



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

ТАБЛИЦА СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ МАЛОМОЩНЫХ КЕНОТРОНОВ

Условное обозначение (тип кенотрона)	Данные цепи накала		Максимальное выпрямленное напряжение U_o, в	Максимальный средний выпрямительный ток I_o, ма	Максимальная мощность потерь на аноде P_a, ма	Максимальная амплитуда обратного напряжения, в	Максимальный импульс анодного тока, ма	Внутреннее сопротивление R_i, ом	Примечание
	напряжение, в	ток, а							
5ВХ1 (5Ц4-С)	5	2	400	125	5	1 400	375	200	Двуханодный кенотрон
5ВХ2 (5U4-С)	5	3	450	225	—	1 550	700	—	Двуханодный кенотрон
5ВХ3 (5Y3-С)	5	2	400	125	—	1 400	375	—	Двуханодный кенотрон
6ВХ1 (6Х5-С)	6,3	0,6	350	70	—	1 250	210	—	Двуханодный кенотрон
ВД8 (2Х2/879)	2,5	1,75	—	7,5	—	12 500	100	—	Одноанодный высоковольтный кенотрон
30ВХ1 (30Ц5-С)	30	0,3	250	90	—	—	250	100	Двуханодный кенотрон
30ВД1 (30Ц1-М)	30	0,3	250	90	—	—	250	—	Двуханодный кенотрон
ВО-188	4	2,05	400	150	—	1 300	500	100	Двуханодный кенотрон
ВО-239	4	2,05	500	180	15	1 800	600	—	Одноанодный кенотрон
V-1906	4	2,5	—	—	—	4 000	—	400	Высоковольтный кенотрон
705-А	5	5	—	100	60	35 000	1 250	—	Высоковольный кенотрон

МАССОВАЯ РАДИО БИБЛИОТЕКА
ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ АКАДЕМИКА А. И. БЕРГА

Выпуск 60

С. Н. КРИЗЕ

РАСЧЕТ МАЛОМОЩНЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ДРОССЕЛЕЙ ФИЛЬТРОВ

Рекомендовано Управлением технической подготовки Центрального комитета добровольного общества содействия армии в качестве пособия для радиоклубов и радиокружков



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1950 ЛЕНИНГРАД

В брошюре даются методы расчета силовых трансформаторов и дросселей фильтров к двухполупериодным выпрямителям с кенотронами или газотронами и рассмотрены конструкции сердечников и катушек к этим деталям выпрямителя. Приводятся примеры таких расчетов.

В брошюре дан также ряд справочных таблиц, полезных при расчете выпрямителей.

Предназначается брошюра для подготовленных радиолюбителей.

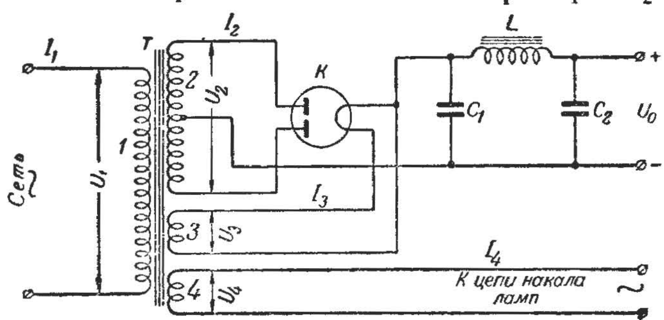
Редактор *Р. М. Малинин* Техн. редактор *С. Н. Бабочкин*

Сдано в набор 17/I 1950 г. Подписано к печати 21/IV 1950 г.
Бумага $84 \times 108^{1}/_{32} = {}^{5}/_{8}$ бум. л.—2,05 печ. л. 3 уч.-изд. л.
Т-02961 Тираж 35 000 экз. Заказ 13

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

1. ПИТАНИЕ РАДИОАППАРАТУРЫ ОТ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Наиболее распространенной схемой выпрямителя, применяемой для питания маломощной радиоаппаратуры, является показанная на фиг. 1 схема двухполупериодного выпрямления. Как видно из схемы, этот выпрямитель состоит из трансформатора T, двуханодного кенотрона K и фильтра, в который входят дроссель L и конденсаторы C_1 и C_2. Трансформатор имеет первичную обмотку, включаемую в сеть переменного тока, и несколько вторичных обмоток. С одной из вторичных обмоток (2), носящей название повышающей обмотки, подается напряжение на аноды кенотрона; остальные вторичные обмотки (понижающие) предназначены для питания цепи накала кенотрона (обмотка 3) и цепи накала ламп приемника, усилителя или другого устройства (обмотка 4).



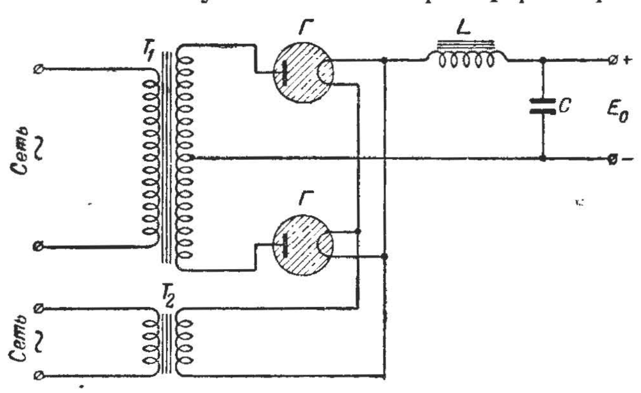
Фиг. 1. Схема кенотронного выпрямителя.

Для уменьшения пульсаций выпрямленного тока служит сглаживающий фильтр, состоящий из двух конденсаторов C_1 и C_2 и дросселя L со стальным сердечником.

В более мощных установках обычно применяются газотронные выпрямители. Схема двухполупериодного газотронного выпрямителя показана на фиг. 2. Эти выпрямители обладают более высоким к. п. д., чем кенотронные.

Одной из особенностей выпрямителя, работающего на газотронах, является порядок включения элементов сглаживающего фильтра: газотроны лучше работают, если фильтр начинается не с конденсатора, как в схеме кенотронного выпрямителя, а с дросселя. Следует отметить, что в кенотронных выпрямителях также иногда может быть использован фильтр, начинающийся с дросселя, что в некоторых случаях может дать несколько лучшие результаты.

Другая особенность газотронного выпрямителя состоит в в наличии в нем двух отдельных трансформаторов—анодного и накального. Дело в том, что газотроны требуют предварительного прогрева до включения анодного напряжения, поэтому трансформатор накала включают на несколько минут раньше, чем трансформатор анодного напряжения.



Фиг. 2. Схема газотронного выпрямителя.

Для расчета трансформатора, работающего в любой схеме выпрямителя, необходимо знать напряжения и токи в его вторичных обмотках.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ КЕНОТРОННОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С КОНДЕНСАТОРНЫМ ФИЛЬТРОМ

При расчете выпрямителя необходимо знать напряжение и ток, которые требуются от него получить. Обозначим через U_0 постоянную составляющую выпрямленного напряжения и через I_0—постоянную составляющую выпрямленного тока.

Для двухполупериодного кенотронного выпрямителя с конденсаторным фильтром (фиг. 1) эффективное напряжение

U_2 и ток I_2 повышающей вторичной обмотки трансформатора связаны с величинами U_0 и I_0 следующими приближенными соотношениями:

$$U_2 = (2 \div 2{,}2)U_0, \qquad (1)$$

$$I_2 = (1 \div 1{,}2)I_0. \qquad (2)^*$$

Токи и напряжения остальных вторичных обмоток, служащих для питания цепей накала, определяются данными накала кенотрона и других ламп, питаемых от данной обмотки. Мощность, снимаемая с каждой из накальных обмоток, равна произведению напряжения этой обмотки на ток в ней:

$$P_3 = U_3 I_3,\ P_4 = U_4 I_4. \qquad (3)$$

Мощность, потребляемая повышающей обмоткой, находится из выражения

$$P_2 = 0{,}7 U_2 \cdot I_2. \qquad (4)$$

Коэффициент 0,7 в выражении (4) обусловлен тем, что эффективный ток повышающей обмотки включает в себя и постоянную составляющую тока, проходящего по этой обмотке. Постоянная же составляющая тока, нагревая повышающую обмотку, не трансформируется в первичную обмотку трансформатора, поэтому мощность, потребляемая вторичной обмоткой, будет меньше, чем произведение $U_2 \cdot I_2$.

Суммарная мощность всех вторичных обмоток трансформатора будет:

$$P_{II} = P_2 + P_3 + P_4 + \ldots + P_n. \qquad (5)$$

Мощность, потребляемая трансформатором (его первичной обмоткой) от сети переменного тока, определяется выражением

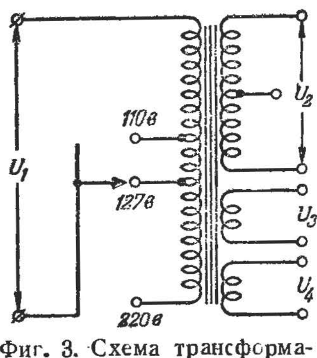
$$P_T = P_1 = \frac{P_2 + P_3 + P_4 + \ldots + P_n}{\eta_T}, \qquad (6)$$

---

* Указанные в формуле коэффициенты являются средними. Они изменяются в зависимости от отношения внутреннего сопротивления кенотрона r к эквивалентному сопротивлению нагрузки R_0, которое определяется как $\frac{U_0}{I_0}$. При относительно малых практически встречающихся соотношениях $\frac{r}{R_0} \approx 0{,}02 \div 0{,}03$ коэффициент в формуле (2) достигает величины 1,4; при относительно больших соотношениях $\frac{r}{R_0} \approx 0{,}2$ этот коэффициент имеет величину меньше единицы. — *Прим. ред.*

η_T — к. п. д. трансформатора, который зависит от размеров последнего.

У малых трансформаторов ($P_T < 100$ *вт*), где потери составляют больший процент от полезной мощности, к. п. д. η_T обычно не превышает 0,7 — 0,85; у трансформаторов большей мощности величина η_T бывает порядка 0,9, доходя до 0,95 при мощности в десятки киловатт.

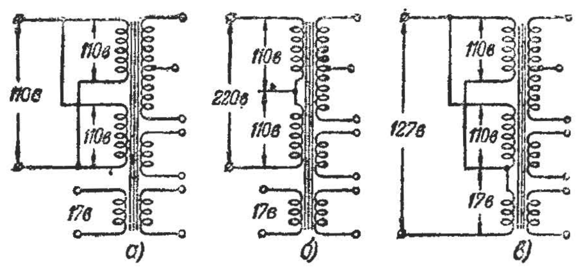


Фиг. 3. Схема трансформатора с отводами в первичной обмотке.

Ток первичной обмотки трансформатора приближенно может быть найден из соотношения

$$I_1 = 1,1 \frac{P_1}{U_1}. \qquad (7)$$

Нередко один и тот же трансформатор предназначается для работы от сетей с разными напряжениями, например 110, 127 и 220 *в*. В этом случае первичная обмотка трансформатора делается с отводами, как это показано на фиг. 3, или имеется несколько секций первичной обмотки, включаемых между собой параллельно или последовательно, в зависимости от величины напряжения сети. Например, удобно иметь три секции первичной обмотки—две секции по 110 *в* каждая и одну сек-



Фиг. 4. Схемы трансформатора с секционированной первичной обмоткой

цию на 17 *в* (фиг. 4). Тогда при параллельном соединении двух секций 110 *в* (фиг. 4,*а*) трансформатор может быть включен в сеть с напряжением 110 *в*, при последовательном включении тех же секций (фиг. 4, *б*) в сеть 220 *в* и при комбинированном включении всех трех секций (фиг. 4, *в*) — в сеть 127 *в*.

Для уяснения порядка расчета напряжений и токов в обмотках трансформатора рассмотрим пример.

Выпрямитель, работающий по схеме фиг. 1 на кенотроне 5ВХ1 (5Ц4С), должен давать выпрямленное напряжение $U_0 = 300$ *в* при токе $I_0 = 100$ *ма*. Потребление тока в цепи накала ламп составляет 1,8 *а* при напряжении 6,3 *в*. Определить напряжения и токи во всех обмотках трансформатора, если напряжение сети $U_1 = 110$ *в*.

1. Напряжение вторичной (повышающей) обмотки

$$U_2 = 2{,}2\,U_0 = 2{,}2 \cdot 300 = 660 \text{ в}.$$

2. Ток повышающей обмотки

$$I_2 = 1{,}2 I_0 = 1{,}2 \cdot 100 = 120 \text{ ма} = 0{,}12 \text{ а}.$$

3. Мощность повышающей обмотки

$$P_2 = 0{,}7 U_2 \cdot I_2 = 0{,}7 \cdot 660 \cdot 0{,}12 = 55 \text{ вт},$$

4. Мощность обмотки накала кенотрона

$$P_3 = U_3 \cdot I_3 = 5 \cdot 2 = 10 \text{ вт}.$$

5. Мощность обмотки накала ламп

$$P_4 = U_4 \cdot I_4 = 6{,}3 \cdot 1{,}8 = 11 \text{ вт}.$$

6. Мощность, потребляемая трансформатором от сети:

$$P_1 = \frac{P_2 + P_3 + P_4}{\eta_T} = \frac{55 + 10 + 11}{0{,}75} \approx 100 \text{ вт}.$$

Коэффициент полезного действия η_T принимаем равным 0,75.

7. Ток первичной обмотки

$$I_1 = 1{,}1 \frac{P_1}{U_1} = 1{,}1 \frac{100}{100} = 1 \text{а}.$$

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ ВЫПРЯМИТЕЛЯ С ДРОССЕЛЬНЫМ ФИЛЬТРОМ

При заданных величинах U_0 и I_0 для двухполупериодного выпрямителя с дроссельным фильтром (фиг. 2) значения U_2 и I_2 можно найти из следующих приближенных соотношений:

$$U_2 = (2{,}25 \div 2{,}5)\,U_0, \qquad (8)$$

$$I_2 = 0{,}71\,I_0, \qquad (9)$$

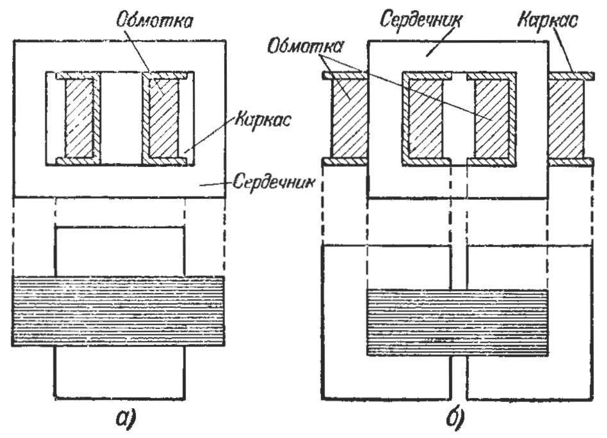
т. е. такой выпрямитель при заданном значении U_0 требует несколько большего напряжения вторичной обмотки трансформатора, но при той же величине выпрямленного тока I_0 ток во вторичной обмотке получается меньшим, чем в случае выпрямителя с конденсаторным фильтром.

Мощность и ток первичной обмотки для выпрямителя с дроссельным фильтром определяются по формулам (6) и (7), как и в случае выпрямителя с конденсаторным фильтром.

4. УСТРОЙСТВО СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Трансформатор состоит из следующих основных частей: 1) сердечника; 2) каркаса; 3) обмоток и 4) деталей, стягивающих сердечник.

Материалом для сборки **сердечника** трансформатора служит листовая трансформаторная сталь, из которой штампуются пластины нужной формы. Толщина пластин бывает обычно от 0,3 до 0,5 *мм*. Они покрываются с одной стороны изолирующим лаком или оклеиваются тонкой папиросной бумагой. Такая изоляция пластин сердечника друг от друга уменьшает потери в сердечнике на вихревые токи, что уменьшает нагрев трансформатора при работе и увеличивает его к. п. д.



Фиг. 5. Трансформаторы броневого и стержневого типа.

В трансформаторах могут применяться сердечники **броневого** (фиг. 5, *а*) или **стержневого** типа (фиг. 5, *б*). Броневой сердечник применяют чаще в трансформаторах

меньшей мощности (обычно до 100—200 *вт*), стержневой сердечник—в более мощных трансформаторах.

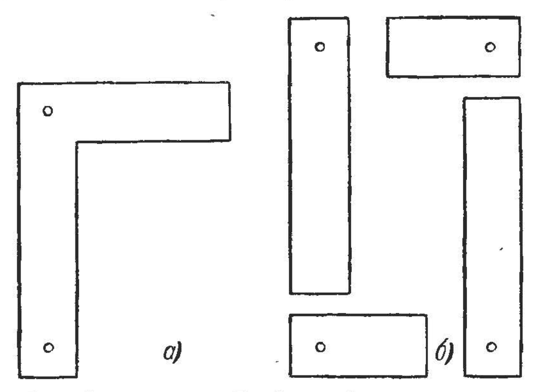
Для сборки броневых сердечников применяют пластины Ш-образной формы (фиг. 6,*а*), поэтому броневые сердечники иногда называются „Ш-образными“ сердечниками. Для устранения зазора между основными листами и перемычками сердечника сборка его ведется „вперекрышку“, для чего перемычка кладется поочередно то с одной, то с другой стороны, как это показано на фиг. 6,*б*.

Перемычки
Пластины
Пластина
Перемычка
а)
б)

Фиг. 6. Пластина Ш-образной формы, перемычка к ней и сборка броневого сердечника „вперекрышку“.

Трансформаторы с сердечником броневого типа имеют одну катушку, на которой размещаются все обмотки трансформатора.

Стержневые сердечники собираются из пластин Г-образной формы (фиг. 7,*а*) или же из прямоугольных пластин (фиг. 7, *б*). В этом случае обмотки размещаются на двух катушках, вследствие чего легче осуществить хорошую изоляцию между обмотками, чем в случае броневого трансформатора.

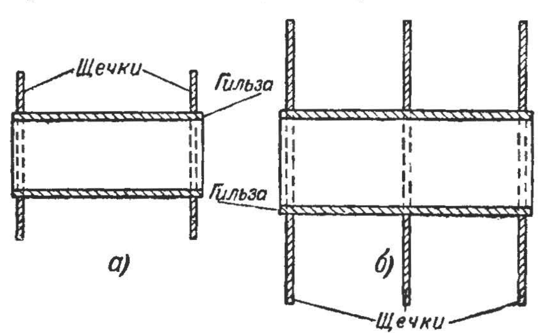


Фиг. 7. Пластины Г-образной и прямоугольной формы для стержневого сердечника.

Пластины сердечника после сборки стягиваются планками или уголками при помощи шпилек с гайками, вставляемых в имеющиеся в пластинках отверстия. Стяжные планки служат одновременно и для прикрепления трансформатора к шасси выпрямителя.

Каркас, на котором размещаются обмотки трансформатора, выполняется обычно из прессшпана и состоит из гильзы и щечек (фиг. 8, *а*). Для трансформаторов с относительно высоким напряжением обмоток (порядка 1 000 *в* и более) часто применяются секционированные каркасы (фиг. 8, *б*), что облегчает изоляцию обмоток. В последнем случае каждая из высоковольтных обмоток разбивается на две или более секций.

При этом на каждую секцию приходится только часть общего напряжения обмотки, что увеличивает надежность



Фиг. 8. Каркасы для трансформатора.

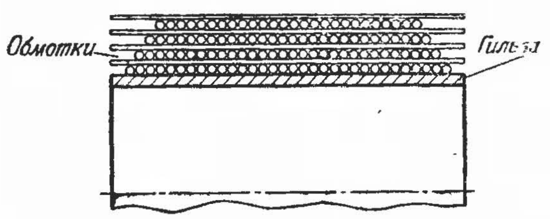
работы трансформатора. Для высоковольтных трансформаторов, в целях улучшения изолирующих свойств, щечки часто выполняются из гетинакса или текстолита.

При крупносерийном производстве трансформаторов малого размера иногда применяются пластмассовые каркасы, обладающие весьма высокими изолирующими качествами.

В целях удешевления производства трансформаторов иногда практикуется так называемая бескаркасная намотка. При этом обмотки наматываются на гильзу, не имеющую щечек. Между слоями обмотки кладутся прокладки из тонкой бумаги, концы которых проклеиваются. Схема бескаркасной намотки показана на фиг. 9. Намотку такого типа можно применять лишь в трансформаторах относительно малого размера, так как при большой высоте намотки (больше 20÷25 *мм*) трудно обеспечить достаточную механическую прочность катушки (возможно сползание верхних крайних витков обмотки).

Обмотки трансформатора выполняются из медного провода с эмалевой, бумажной или шелковой изоляцией. В ма-

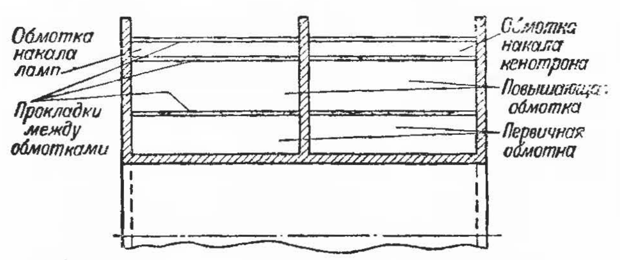
лых трансформаторах чаще всего применяется провод с эмалевой изоляцией (ПЭ), как наиболее дешевый и занимающий, при прочих равных условиях, наименьшее место на каркасе. Провода с бумажной изоляцией (ПБД) обычно применяются в трансформаторах большой мощности, для обмоток



Фиг. 9. Схема бескаркасной намотки катушки.

которых необходим провод диаметром примерно 1,5—2 *мм* и больше. Провода с шелковой изоляцией (ПШД, ПШО), а также с эмалево-шелковой изоляцией (ПЭШД, ПЭШО) находят основное применение в обмотках высокого напряжения ($U > 1\,000$ *в*), где опасность междувиткового пробоя особенно велика и где предъявляются повышенные требования к электрической прочности изоляции провода.

В целях предохранения трансформатора от пробоя между слоями обмоток помещаются изолирующие прокладки из



Фиг. 10. Катушка трансформатора в разрезе.

тонкой бумаги или лакоткани. В случае проводов с эмалевой изоляцией прокладки целесообразно помещать после каждого слоя, для других проводов через 3—5 слоев намотки.

Для защиты трансформатора от влаги, а также для повышения его электрической прочности катушки трансформатора после намотки пропитываются специальным составом, например церезином или изолирующим лаком. В некоторых

случаях после пропитки катушка дополнительно покрывается поверхностным слоем битума, что значительно повышает влагостойкость трансформатора.

Порядок расположения обмоток на каркасе трансформатора принципиальной роли не играет. Здесь руководствуются главным образом соображениями удобства намотки. Обычно внизу помещают высоковольтную или первичную обмотку трансформатора, а накальные обмотки располагают сверху. Например, возможно расположение обмоток, показанное на фиг. 10. Все обмотки трансформатора должны обязательно отделяться друг от друга прокладками из бумаги или лакоткани толщиной примерно 1—2 *мм* (при рабочем напряжении до 1 000 *в*).

Выводы обмоток трансформатора выполняются из мягкого многожильного провода с хорошей изоляцией.

5. КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Ниже приводится упрощенный метод конструктивного расчета маломощных однофазных силовых трансформаторов, пригодный для мощностей до нескольких сотен ватт. Этот метод, несмотря на свою простоту, дает точность, вполне удовлетворительную для практических целей.

При расчете трансформатора всегда бывают заданы:

1) напряжение U_1 питающей сети, подаваемое на первичную обмотку;

2) эффективные напряжения вторичных обмоток $U_2, U_3, \ldots$ $\ldots, U_n$;

3) эффективные токи вторичных обмоток $I_2. I_3, \ldots, I_n$. Кроме того, иногда бывает известен наиболее желательный тип сердечника.

В результате расчета трансформатора должны быть найдены:

1) тип сердечника (если он не задан) и его габариты;

2) количество витков каждой из обмоток ($w_1, w_2, \ldots, w_n$);

3) диаметр провода каждой обмотки ($d_1, d_2, \ldots, d_n$).

Расчет следует начинать с определения типа и размеров сердечника трансформатора.

Если тип сердечника трансформатора задан, то приводимые ниже формулы могут быть использованы для его поверочного расчета.

Определение типа и размеров сердечника. Перед тем, как приступить к конструктивному расчету трансформатора,

нужно определить суммарную мощность всех его вторичных обмоток P_{II} по формуле (5) и по величине P_{II} выбрать согласно табл. 1:

1) индукцию в сердечнике трансформатора B;

2) коэффициент полезного действия трансформатора η_T;

3) плотность тока в обмотке трансформатора Δ.

Кроме того, по табл. 2 нужно определить $k_м$ — коэффициент заполнения окна сердечника медью, т. е. отношение суммарного сечения меди всех витков первичной и вторичных обмоток трансформатора к площади окна сердечника.

Располагая всеми этими данными, мы можем вычислить основной параметр, характеризующий сердечник трансформатора данной мощности, а именно произведение сечения сердечника $Q_{ж}$ на площадь окна Q_o:

$$Q_o Q_{ж} = \frac{10^4}{B} \frac{P_{II}(1+\eta_T)}{2\eta_T k_м \Delta}. \qquad (10^*)$$

Таблица 1

Мощность трансформатора, *ва*	*B, гс*	η_T	Δ, *а/мм²*
До 10	$(5 \div 6) \cdot 10^3$	0,6—0,7	2,5—3
10—30	$7 \cdot 10^3$	0,7—0,8	2,5
30—50	$8 \cdot 10^3$	0,8—0,85	2—2,5
50—100	10^4	0,85—0,9	2—2,5
Больше 100	$11 \cdot 10^3$	0,9	2

Труднее всего правильно выбрать коэффициент заполнения окна сердечника медью $k_м$. Если величина $k_м$ выбрана слишком малой, сердечник будет недоиспользован, если величина $k_м$ взята слишком большой, обмотки трансформатора могут не поместиться в окне.

Коэффициент заполнения $k_м$ зависит от диаметра и вида изоляции провода, а также от рабочего напряжения трансформатора. С уменьшением диаметра провода и повышением рабочего напряжения процент площади, занимаемой изоляцией и прокладками, увеличивается, а коэффициент заполнения уменьшается. Величину $k_м$ для встречающихся в радиолюбительской практике трансформаторов с максимальным напряже-

* Вывод этой формулы дан в приложении (стр. 55).

нием до 1 000 $в$ приближенно можно определить следующим образом.

Вычислив по формулам (2) и (7) токи во вторичной повышающей и в первичной обмотках (I_2 и I_1) и задавшись токами, которые нам нужно получить от накальных обмоток (I_3, $I_4, \dots$ $\dots, I_n$), а также плотностью тока Δ в обмотках, определяем диаметры их проводов.

Принимая плотность тока $\Delta = 2$ $а/мм^2$, необходимые диаметры проводов обмоток находим по формуле

$$d_n = 0{,}8\sqrt{I_n}. \qquad (11)$$

При плотности тока $\Delta = 2{,}5$ $а/мм^2$ минимально необходимые диаметры проводов находим по формуле

$$d_n = 0{,}7\sqrt{I_n}. \qquad (12)$$

В последних двух формулах индексы n соответствуют номерам обмоток, сила тока выражается в амперах.

По вычисленному диаметру проводов и их маркам изоляции находим по табл. 2 коэффициенты заполнения для первичной и вторичной обмоток. Найденные коэффициенты складываем и сумму делим на два. Полученную в результате величину $k_м$ подставляем в формулу (10).

Таблица 2

Диаметр провода, *мм*	Марка изоляции		
	ПЭ	ПЭШД, ПШД	ПБД
0,1—0,2	0,1—0,2	—	—
0,2—0,4	0,2—0,3	0,1—0,2	—
0,4—0,8	0,3—0,35	0,2—0,3	0,1—0,2
0,8—1,5	0,35—0,45	0,3—0,35	0,2—0,3

Если в формулу (10) подставить наиболее вероятные величины:

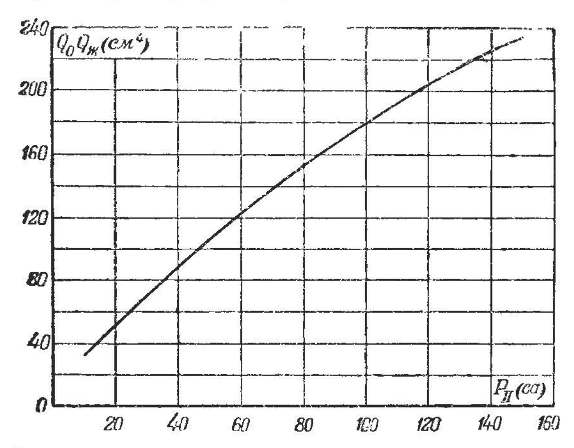
$$B = 10^4 \ гс; \ \eta_T = 0{,}8; \ \Delta = 2 \ а/мм^2 \ и \ k_м = 0{,}3,$$

то получим:

$$Q_o Q_{ж} \approx 2P_{II} \ [ва], \qquad (13)$$

т. е. произведение площади окна на площадь железа сердечника должно быть приблизительно равно удвоенной мощности трансформатора.

На фиг. 11 приведен график для ориентировочного определения размеров трансформатора по заданной мощности.

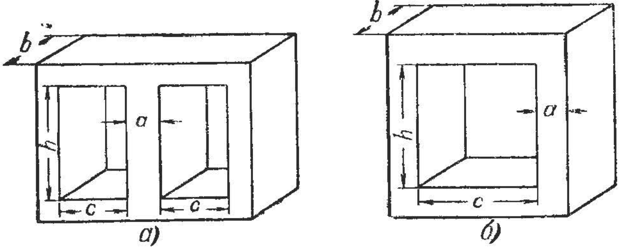


Фиг. 11. График для определения размеров трансформатора по заданной полезной мощности.

Если задан тип (штамп) сердечника, то минимально необходимая толщина набора (b — фиг. 12) находится из выражения:

$$b = \frac{Q_0 Q_{ж}}{ahc}. \tag{14}$$

Размеры a, h, c показаны на фиг. 12.



Фиг. 12. Основные размеры сердечника броневого типа (Ш-образного) а) и стержневого типа (0-образного) б).

Расчет обмоток трансформатора. Количество витков первичной обмотки w_1 находим из формулы

$$w_1 = \frac{U_1 \cdot 10^6}{2(BQ_{ж} + l_0 \Delta 10^3)}, \tag{15}$$

где U_1 — напряжение сети;

B — индукция в сердечнике в *гс*;

$Q_{жс}$ — площадь сечения сердечника в *см*²;

l_0 — средняя длина витка в *см*;

Δ — плотность тока в *а/мм*².

Второе слагаемое знаменателя представляет собой поправку на падение напряжения в омическом сопротивлении первичной обмотки. Оценим порядок величины этой поправки.

Для трансформатора мощностью около 50—100 *вт* величины, входящие в знаменатель, имеют приблизительно такое значение:

$$B = 10^4 \text{ гс}; \ Q_{жс} = 10 \text{ см}^2; \ l_0 = 20 \text{ см}; \ \Delta = 2 \text{ а/мм}^2.$$

Следовательно, $BQ_{жс} = 10^5$; $l_0\Delta 10^2 = 4 \cdot 10^3$, т. е. поправка на падение напряжения в омическом сопротивлении обмотки составляет около 4%.

Приближенная формула для определения количества витков первичной обмотки трансформатора при индукции $B \approx \approx 10^4$ *гс* имеет вид:

$$w_1 \approx 48 \frac{U_1}{Q_{жс}}. \quad (16)$$

Число витков любой из вторичных обмоток w_n вычисляется по формуле

$$w_n = \frac{U_n \cdot 10^6}{2(BQ_{жс} - l_0\Delta 10^2)}, \quad (17)$$

где U_n — напряжение данной обмотки.

Поправка на падение напряжения во вторичных обмотках получается того же порядка, что и для первичной обмотки, но она имеет обратный знак.

Приближенная формула для определения количества витков любой из вторичных обмоток для $B \approx 10^4$ *гс* имеет следующий вид:

$$w_n = 52 \frac{U_n}{Q_{жс}}. \quad (18)$$

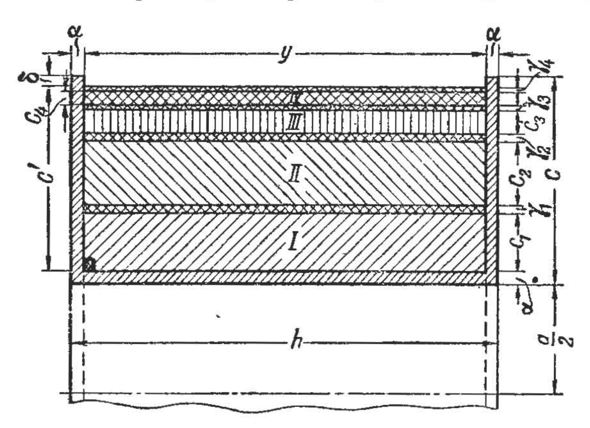
Диаметры проводов обмоток мы уже вычислили ранее (см. формулы (11) и (12)).

Проверка размещения обмоток. После того как найдены числа витков и диаметры проводов каждой из обмоток, следует проверить размещение обмоток в окне сердечника. Такая

проверка особенно желательна, учитывая, что при определении размеров сердечника мы задавались приближенным значением коэффициента заполнения окна медью $k_м$. Рассмотрим, как производится проверка размещения обмоток для трансформатора броневого типа. Сначала находим длину y, занимаемую обмотками (фиг. 13),

$$y = h - 2a, \tag{19}$$

где a — толщина каркаса, которая берется порядка 1,5—2 *мм*.



Фиг. 13. Катушка трансформатора броневого типа в разрезе.

Затем определяем число витков в слое для нижней (первичной) обмотки трансформатора:

$$w_1' = \frac{y}{d_1'}, \tag{20}$$

где d_1' — диаметр провода данной обмотки с учетом изоляции. Величина d_1' находится из справочной таблицы (стр. 33) по известному из предыдущего расчета диаметру провода без изоляции и в соответствии с выбранным видом изоляции провода (ПЭ, ПШД и пр.).

Далее находим число слоев первичной обмотки

$$n_1 = \frac{w_1}{w_1'}. \tag{21}$$

Величину n_1 округляем до ближайшего большего целого числа.

Высоту обмотки с учетом изоляционных прокладок находим из выражения

$$c_1 = n_1 (d_1' + \beta) + \gamma, \tag{22}$$

где β — толщина прокладок между слоями; γ — толщина прокладок между обмотками. Обычно $\beta \approx 0{,}05 \div 0{,}15$ *мм*, $\gamma = 1-2$ *мм*.

Подобным же образом находим высоту всех остальных обмоток:

$$\left.\begin{aligned} c_2 &= h_2 (d_2' + \beta) + \gamma, \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots \\ c_n &= n_n (d_n' + \beta) + \gamma. \end{aligned}\right\} \tag{23}$$

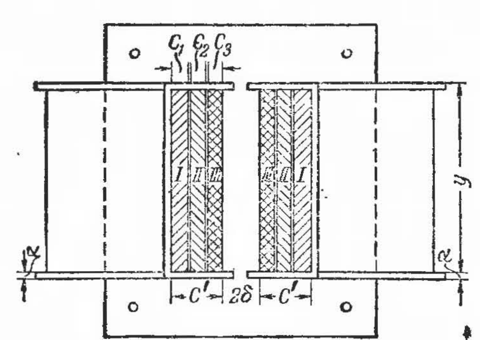
Полная высота всех обмоток трансформатора будет равна:

$$c' = c_1 + c_2 + c_3 + \ldots + c_n. \tag{24}$$

Высота незанятой обмотками части катушки

$$\delta = c - (c' + a). \tag{25}$$

Эта величина должна оказаться по расчету порядка 5 *мм*. Если $\delta < 5$ *мм*, то при намотке трансформатора его обмотки могут не поместиться в окне сердечника. В этом случае целесообразно пересчитать трансформатор на несколько бóльшую толщину набора. Если $\delta > 5 \div 10$ *мм*, значит размеры сердечника выбраны с излишним запасом. В последнем случае можно пересчитать трансформатор, уменьшив толщину набора b.



Фиг. 14. Стержневой трансформатор в разрезе.

Для трансформаторов стержневого типа проверка размещения обмоток производится аналогичным образом, но при расчете учитывается, что на каждой катушке наматывается половина витков каждой из обмоток (фиг. 14). Расстояние между катушками 2δ для низковольтных трансформаторов должно быть порядка 10 *мм*.

Пример расчета силового трансформатора. Рассчитать силовой трансформатор по следующим данным: напряжение сети $U_1 = 110$ и 127 *в*; напряжение повышающей обмотки $U_2 = 700$ *в*; эффективный ток вторичной обмотки $I_2 = 0,1$ *а*; трансформатор должен иметь обмотку накала ламп, дающую $U_3 = 6,3$ *в* при $I_3 = 1,75$ *а*, и обмотку накала кенотрона, дающую $U_4 = 5$ *в* при $I_4 = 2$ *а*.

1. Определяем суммарную мощность вторичных обмоток трансформатора:

$$P_{II} = 0,7\, I_2 U_2 + I_3 U_3 + I_4 U_4 = 0,7 \cdot 0,1 \cdot 700 + 1,75 \cdot 6,3 + 2 \cdot 5 = 69 \text{ ва}.$$

2. Определяем силу тока в первичной обмотке по формуле (7):

$$I_1 = 1,1 \frac{69}{110} = 0,69 \text{ а}.$$

3. Задаваясь в соответствии с данными табл. 1 плотностью тока в обмотках трансформатора $\Delta = 2$ *а/мм²*, находим по формуле (12) диаметры проводов каждой из обмоток.

Диаметр провода первичной обмотки

$$d_1 = 0,8\sqrt{I_1} = 0,8\sqrt{0,69} = 0,67.$$

Берем провод ближайшего стандартного диаметра 0,69 *мм*. Диаметр провода вторичной обмотки

$$d_2 = 0,8\sqrt{I_2} = 0,8\sqrt{0,1} = 0,25 \text{ мм}.$$

Диаметр провода обмотки накала ламп

$$d_3 = 0,8\sqrt{I_3} = 0,8\sqrt{1,75} = 1 \text{ мм}.$$

Диаметр провода обмотки накала кенотрона

$$d_4 = 0,8\sqrt{I_4} = 0,8\sqrt{2} = 1,13 \text{ мм}.$$

Берем провод ближайшего стандартного диаметра 1,16 *мм*.

По табл. 2 находим коэффициенты заполнения для вычисленных диаметров проводов, считая, что ввиду относительно малого рабочего напряжения все провода могут иметь эмалевую изоляцию (ПЭ). Для $d_1 = 0,69$ *мм* принимаем $k_{м_1} \approx 0,33$; для $d_2 = 0,25$ принимаем $k_{м_2} \approx 0,25$; для $d_3 = 1$ *мм* и $d_4 = 1,16$ *мм* принимаем $k_{м_{3,4}} \approx 0,4$. Следовательно, средний коэффициент заполнения по меди ориентировочно будет равен

$$k_м \approx \frac{0,33 + 0,25 + 0,4 + 0,4}{4} \approx 0,34.$$

Принимаем с округлением $k_м = 0,3$.

4. Для выбора типа и размера сердечника находим по табл. 1 необходимые величины: $B = 10^4$ *гс*, $\eta = 0,87$, $\Delta = 2$ *а/мм²*. Подставляя эти числа, а также вычисленные ранее величины $P_{II} = 69$ *ва* и $k_м = 0,3$ в формулу (10), находим:

$$Q_o Q_ж = \frac{10^4}{B} \cdot \frac{P_{II}(1 + \eta_T)}{2\eta_T k_м \Delta} = \frac{10^4}{10^4} \cdot \frac{69(1 + 0,87)}{2 \cdot 0,87 \cdot 0,3 \cdot 2} = 124 \text{ см}^4.$$

5. Из таблицы в приложении 1 (стр. 33) видно, что для сборки сердечника наиболее подходящими будут пластины типа Ш-25. По формуле (14) найдем минимальную толщину набора сердечника с такими пластинами:

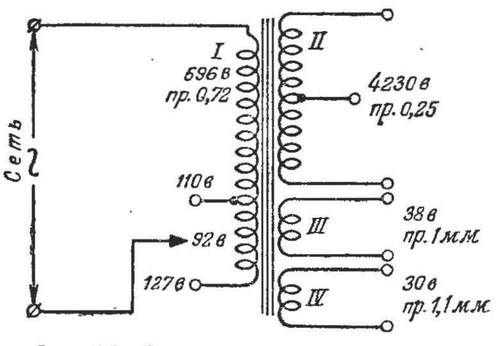
$$b = \frac{Q_{жс} \cdot Q_o}{ahc} = \frac{124}{2{,}5 \cdot 2{,}5 \cdot 6} = 3{,}3 \ см.$$

Округляем эту величину до 3,5 *см*. Тогда

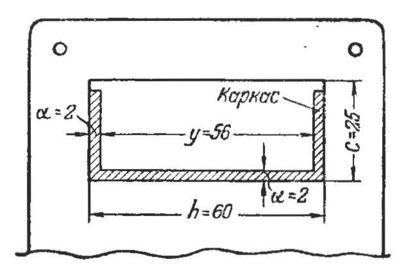
$Q_{жс} = 2{,}5 \cdot 3{,}5 = 8{,}75 \ см^2$; $Q_{жс} \cdot Q_o = abhc = 2{,}5 \cdot 3{,}5 \cdot 2{,}5 \cdot 6 = 131 \ см^4$.

6. Число витков первичной обмотки на 127 *в*

$$w_1 = \frac{U_1 \cdot 10^6}{2(BQ_{жс} + l\Delta 10^2)} = \frac{127 \cdot 10^6}{2(10^4 \cdot 8{,}75 + 24 \cdot 2 \cdot 10^3)} = 688.$$



Фиг. 15. Схема трансформатора, рассчитанного в примере, приведенном в тексте.



Фиг. 16. Разрез катушки трансформатора, рассчитанного в приведенном примере.

Для работы при напряжении сети 110 *в* необходимо сделать вывод: от $688 \frac{110}{127} = 596$ витков.

7. Число витков вторичной (повышающей) обмотки

$$w_2 = \frac{U_2 \cdot 10^6}{2(BQ_{жс} - l_0\Delta 10^2)} = \frac{700 \cdot 10^6}{2(10^4 \cdot 8{,}75 - 24 \cdot 2 \cdot 10^3)} = 4\,230.$$

8. Число витков обмотки накала ламп

$$w_3 = \frac{U_3 \cdot 10^6}{2(BQ_{жс} - l_0\Delta 10^2)} = \frac{6{,}3 \cdot 10^6}{16{,}54 \cdot 10^4} = 38.$$

9. Число витков обмотки накала кенотрона

$$w_4 = \frac{U_4 \cdot 10^6}{2(BQ_{жс} - l_0\Delta 10^2)} = \frac{5 \cdot 10^6}{16{,}54 \cdot 10^4} = 30.$$

Схема рассчитанного нами трансформатора показана на фиг. 15.

Сделаем проверку размещения обмоток трансформатора в окне сердечника.

10. Из эскиза сечения катушки (фиг. 16) находим длину обмотки

$$y = h - 2\alpha = 60 - 2 \cdot 2 = 56 \text{ мм},$$

где толщина каркаса $\alpha = 2$ *мм*.

11. Число витков в слое первичной обмотки

$$w_1' = \frac{y}{d_1'} = \frac{56}{0{,}73} = 76,$$

где диаметр провода первичной обмотки ПЭ 0,69 с изоляцией $d' = 0{,}73$ *мм*

12. Количество слоев первичной обмотки

$$n_1 = \frac{w_1}{w_1'} = \frac{683}{76} = 9.$$

13. Высота первичной обмотки с учетом изоляционных прокладок

$$c_1 = n_1 (d_1' + \beta) + \gamma = 9 (0{,}73 + 0{,}07) + 1{,}0 = 8{,}2,$$

где толщина прокладок между слоями $\beta = 0{,}07$ *мм*, толщина прокладок между обмотками $\gamma = 1$ *мм*.

14. Число витков в слое повышающей обмотки

$$w_2' = \frac{y}{d_2'} = \frac{56}{0{,}27} = 208,$$

где $d_2' = 0{,}27$ *мм* для провода ПЭ диаметром 0,25 *мм*.

15. Количество слоев повышающей обмотки

$$n_2 = \frac{w_2}{w_2'} = \frac{4\,230}{208} = 21.$$

16. Высота обмотки

$$c_2 = n_2 (d_2' + \beta) + \gamma = 21 (0{,}27 + 0{,}07) + 1{,}0 = 8{,}1 \text{ мм}.$$

17. Число витков в слое обмотки накала ламп

$$w_3' = \frac{y}{d_3'} = \frac{56}{1{,}05} = 53,$$

где $d_3' = 1{,}05$ *мм* для провода ПЭ диаметром 1 *мм*.

18. Количество слоев обмотки накала ламп

$$n_3 = \frac{w_3}{w_3'} = \frac{38}{53} = 0{,}72.$$

Следовательно, эта обмотка уложится в один слой.

19. Высота обмотки накала ламп

$$c_3 = n_3 d_3' + \gamma = 1{,}05 + 1 = 2{,}05 \approx 2 \text{ мм}.$$

20. Число витков в слое обмотки накала кенотрона

$$w'_4 = \frac{y}{d'_4} = \frac{56}{1,22} = 46.$$

Количество слоев данной обмотки также равно единице, так как $w_3 < w'_3$.

21. Высота обмотки накала кенотрона

$$c_4 = n_4 d'_4 + \gamma = 1,22 + 1,0 \approx 2,2 \text{ мм.}$$

22. Полная высота всех обмоток трансформатора

$$c' = c_1 + c_2 + c_3 + c_4 = 8,2 + 8,1 + 2 + 2,2 = 20,5 \text{ мм.}$$

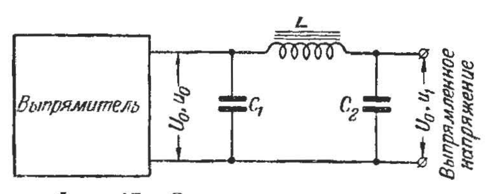
23. Зазор между обмоткой и сердечником

$$\delta = c - (c' + a) = 25 - (20,5 + 1,5) = 3 \text{ мм,}$$

что допустимо.

6. СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ ДЛЯ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Для удовлетворительной работы приемно-усилительной и иной аппаратуры обычно допустима весьма малая величина пульсаций, значительно меньшая той, которая получается непосредственно после выпрямителя. Для уменьшения величины пульсаций после выпрямителя включают сглаживающий фильтр (фиг. 17), значительно ослабляющий переменную составляющую выпрямленного напряжения и мало влияющий на его постоянную составляющую.



Фиг. 17. Схема к выпрямителю.

Обозначим амплитуду пульсаций на выходе выпрямителя (до фильтра) через Δu_0, постоянную составляющую выпрямленного напряжения через U_0. Относительная величина пульсаций выпрямленного напряжения определяется значением $\frac{\Delta u_0}{U_0}$, которое зависит от схемы и условий работы выпрямителя. Для фильтра, начинающегося с индуктивности, при двухполупериодном выпрямлении $\frac{\Delta u_0}{U_0} = 0,67$, или 67%. Для фильтра

с конденсаторным входом при двухполупериодном выпрямлении величина $\frac{\Delta u_0}{U_0}$ имеет порядок 0,05—0,2 *.

Качество сглаживающего фильтра определяется его коэффициентом фильтрации ϕ, который показывает, во сколько раз ослабляется переменная слагающая напряжения на выходе фильтра u_1 относительно переменной слагающей u_0 на его входе:

$$\phi = \frac{u_0}{u_1}. \tag{26}$$

Допустимая величина переменной составляющей напряжения на выходе фильтра зависит от вида и условий работы аппаратуры, питаемой данным выпрямителем.

При расчете фильтров для питания анодных цепей усилителей низкой частоты следует руководствоваться следующим правилом. Амплитуда пульсаций анодного напряжения не должна превышать 0,5 – 1% от величины напряжения полезного сигнала, действующего в анодной цепи данного каскада.

Для каскадов усиления высокой частоты приемника амплитуда пульсаций анодного напряжения не должна превышать 0,05—0,1% от величины анодного напряжения данного каскада, что обычно составляет ~ 0,1—0,2 *в*.

Для первых каскадов передатчика амплитуда пульсаций не должна превышать 0,02—0,05% от величины анодного напряжения. Для остальных каскадов передатчика допустимый процент пульсаций повышается приблизительно до 0,1%.

Зная величину переменной составляющей напряжения на выходе и входе фильтра, легко определить необходимое значение коэффициента фильтрации (коэффициента сглаживания) данного фильтра.

---

* В фильтрах выпрямителей, дающих напряжение $U_0 \leqslant 500$ *в*, в настоящее время применяются почти исключительно электролитические конденсаторы, для нормальной работы которых необходимо, чтобы отношение амплитуды переменной составляющей к постоянной составляющей не превышало некоторой критической величины. Так, например, для конденсаторов емкостью до 20 *мкф* амплитуда переменной слагающей (при питании выпрямителя от сети с частотой 50 *гц*) не должна превышать $(0{,}07 \div 0{,}08)\ U_0$; для конденсаторов с большей емкостью необходимо, чтобы $\frac{\Delta u_0}{U_0} \leqslant 0{,}04 \div 0{,}06$. Соответствующая величина пульсации Δu_0 может быть достигнута применением конденсатора с достаточно большой емкостью на входе фильтра. При невыполнении указанного выше условия увеличивается ток утечки через конденсатор, его температура повышается и конденсатор может в короткий срок выйти из строя. — *Прим. ред.*

Наиболее распространенная схема сглаживающего фильтра показана на фиг. 17. Фильтрующее действие входной емкости фильтра C_1 учитывается при определении пульсаций, даваемых выпрямителем. Коэффициент сглаживания фильтра по фиг. 17 при двухполупериодном выпрямлении переменного тока с частотой 50 *гц* определяется по формуле

$$ф = 40 \cdot 10^4 LC_2 - 1, \qquad (27)$$

где L — индуктивность дросселя в *гн*;

C_2 — емкость конденсатора на выходе фильтра в *ф*.

Обычно $ф \gg 1$, что позволяет пренебречь единицей по сравнению с первым членом. Тогда

$$ф = 40 \cdot 10^4 LC_2. \qquad (27')$$

Из выражения (27′) видно, что фильтрация $ф$ зависит от произведения LC_2 и не зависит от каждой из входящих в нее величин, взятых в отдельности. Обычно задаются величиной C порядка 8—25 *мкф* и определяют необходимую индуктивность дросселя L:

$$L = \frac{ф}{40 \cdot 10^4 \cdot C_2}. \qquad (28)$$

Величина L, найденная из выражения (28), не должна быть чрезмерно большой, так как дроссель при этом получится трудно выполнимым в конструктивном отношении.

Геометрические размеры дросселя зависят от величины произведения LI_0^2, где I_0 — постоянная составляющая тока, протекающая через дроссель. Дроссель легко может быть выполнен на сердечнике небольшого габарита (Ш-19; Ш-20) при условии, что $LI_0^2 \leqslant 0{,}2—0{,}3$. Здесь величину I_0 нужно подставлять в амперах. Если, например, $I_0 = 0{,}1$ *а*, то индуктивность L желательно иметь не больше 20—30 *гн*, иначе размеры сердечника дросселя могут получаться неприемлемо большими.

Если заданную величину фильтрации $ф$ в одной ячейке фильтра получить не удается, что часто имеет место на практике, применяют фильтр, состоящий из нескольких ячеек.

Схема многоячеечного фильтра показана на фиг. 18. Коэффициент фильтрации для такого фильтра будет приближенно равен произведению коэффициентов фильтраций отдельных ячеек:

$$ф = ф_1 \cdot ф_2 \ldots ф_n. \qquad (29)$$

Если ячейки фильтра одинаковы, то

$$\text{ф} = \text{ф}^{n}, \tag{30}$$

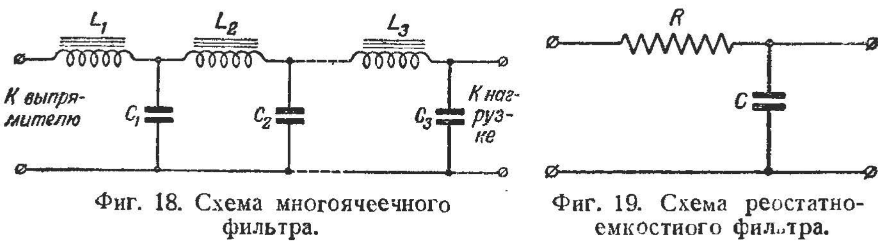
где n — число ячеек фильтра.

При заданном значении общего коэффициента фильтрации ф можно определить коэффициент фильтрации каждой ячейки из выражения

$$\text{ф}_1 = \sqrt[n]{\text{ф}}. \tag{31}$$

В то же время для каждой из ячеек фильтра остается справедливым выражение (27).

Иногда в фильтре применяются ячейки реостатно-емкостного типа (фиг. 19). Основной недостаток такого фильтра —



Фиг. 18. Схема многоячеечного фильтра.

Фиг. 19. Схема реостатно-емкостного фильтра.

значительное падение на нем постоянной составляющей выпрямленного напряжения, так как для получения хорошей фильтрации сопротивление R должно быть значительной величины. Это дает возможность применять реостатно-емкостный фильтр лишь при относительно малых токах порядка нескольких миллиампер.

Коэффициент фильтрации реостатно-емкостной ячейки фильтра для двухполупериодного выпрямителя находится из выражения

$$\text{ф} = 628CR. \tag{32}$$

Для многоячеечного реостатно - емкостного фильтра (фиг. 20) также справедливо приближенное выражение (29).

Фиг. 20. Схема многоячеечного реостатно-емкостного фильтра.

При расчете реостатно-емкостного фильтра обычно задаются допустимым падением выпрямленного напряжения ΔU_0, откуда находят сопротивление

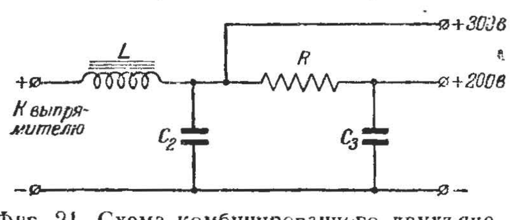
$$R = \frac{\Delta U_0}{I_0}. \tag{33}$$

Затем по заданной фильтрации находят емкость C:

$$C = \frac{\phi}{628 R}. \quad (34)$$

Нередко в фильтрах используются комбинации дроссельных и реостатно-емкостных ячеек. Пример схемы такого фильтра показан на фиг. 21.

Пример расчета фильтра к выпрямителю. Рассчитать сглаживающий фильтр к выпрямителю, если известно, что для питания первых каскадов установки требуется напряжение $U_{01} = 200$ *в* при токе $I_{01} = 2,5$ *ма*, а для питания выходных каскадов — напряжение $U_{02} = 300$ *в* при токе $I_{02} = 80$ *ма*. Напряжение на входе фильтра $U_0 = 330$ *в*. Амплитуда пульсаций для первых каскадов не должна превышать 0,06% от величины U_{01}. Для выходных каскадов амплитуда пульсаций не должна превышать 1% от величины U_{02}.



Фиг. 21. Схема комбинированного двухъячеечного фильтра.

Целесообразно выполнить фильтр по схеме, показанной на фиг. 21. В этом случае дроссельная ячейка фильтра будет осуществлять фильтрацию общего тока всей установки (80 + + 2,5 = 82.5 *ма*), а реостатно-емкостная ячейка — фильтрацию только малого тока первых каскадов (2,5 *ма*).

1. Найдем допустимую амплитуду пульсаций на выходе второй ячейки фильтра:

$$\Delta u_2 = 0,06 \cdot 10^{-2} U_{02} = 0,06 \cdot 10^{-2} \cdot 200 = 0,12 \text{ в}.$$

2. Амплитуда пульсаций на выходе первой ячейки фильтра

$$\Delta u_1 = 1 \cdot 10^{-2} U_{01} = 10^{-2} \cdot 300 = 3 \text{ в}.$$

3. Коэффицнент сглаживания реостатно-емкостной ячейки

$$\phi_2 = \frac{\Delta u_1}{\Delta u_2} = \frac{3}{0,12} = 25.$$

4. Коэффициент сглаживания дроссельной ячейки найдем, задавшись пульсацией на входе фильтра $\Delta u_0 = 0,1 U_0 = 0,1 \times \times 330 = 33$ *в*:

$$\phi_1 = \frac{\Delta u_0}{\Delta u_1} = \frac{33}{3} = 11.$$

5. Сопротивление реостатно-емкостной ячейки вычислим по формуле (33):

$$R = \frac{\Delta U_0}{I_0} = \frac{U_{01} - U_{02}}{I_{02}} = \frac{300 - 200}{2{,}5 \cdot 10^{-3}} = 40 \cdot 10^3 \ ом.$$

6. Емкость конденсатора C_3 определим по формуле (34):

$$C_3 = \frac{\phi_2}{628R} = \frac{25}{628 \cdot 40 \cdot 10^3} = 10^{-6} \ ф = 1 \ мкф.$$

7. Принимая $C_2 = 10$ *мкф*, индуктивность дросселя определим по формуле (28),

$$L = \frac{11}{4 \cdot 10^4 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 27{,}5 \ гн.$$

8. Сопротивление дросселя постоянному току

$$r_{др} = \frac{U_0 - U_{01}}{I_{01} + I_{02}} = \frac{330 - 300}{(80 + 2{,}5) \cdot 10^{-3}} = 364 \ ом.$$

9. Найдем произведение LI_0^2, определяющее размеры дросселя $LI_0^2 = 27{,}5\,(82{,}5 \cdot 10^{-3})^2 = 0{,}187$, что допустимо.

7. КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ ДРОССЕЛЯ ФИЛЬТРА

Для получения достаточно хорошей фильтрации, как было показано выше, дроссель фильтра должен иметь достаточно большую индуктивность—обычно порядка десятков генри. Такую индуктивность практически можно получить, лишь применяя дроссель с сердечником из ферромагнитного материала. Практически дроссели фильтров выполняются с сердечниками из трансформаторной стали и по своей конструкции мало отличаются от трансформаторов.

Дроссель, подобно трансформатору, состоит из сердечника, обмотки, каркаса и деталей, скрепляющих сердечник.

Для малых дросселей чаще всего применяются броневые сердечники таких же типов, что и для трансформаторов, но меньших размеров.

Вследствие того, что через дроссель фильтра протекает значительная постоянная составляющая выпрямленного тока, сердечник дросселя сильно намагничивается постоянным магнитным потоком. При этом, как известно из электротехники, намного уменьшается магнитная проницаемость материала сердечника. Для уменьшения постоянного подмагничивания сер-

дечника в нем применяется воздушный зазор или зазор какого-либо другого немагнитного материала. Для каждого конкретного случая существует наивыгоднейшая длина зазора в сердечнике, при которой дроссель обладает наибольшей индуктивностью.

При конструктивном расчете дросселя необходимо определить следующие его данные:

1) тип и размеры сердечника;
2) количество витков обмотки w;
3) диаметр провода d в *мм*;
4) длину воздушного зазора $l_в$ в *мм*.

Заданными величинами (известными из электрического расчета фильтра) при этом являются:

1) индуктивность дросселя L в *гн*;
2) ток, протекающий через дроссель I_0, в *ма*;
3) активное сопротивление обмотки дросселя $r_{др}$ в *ом*.

Расчет дросселя, подобно расчету трансформатора, целесообразно начать с выбора сердечника.

Выбор размеров сердечника дросселя следует производить, исходя из заданной величины LI_0^2, которая характеризует магнитную энергию, запасаемую в сердечнике. Чем больше величина LI_0^2, тем больший объем должен иметь сердечник дросселя.

Для определения минимальной величины объема сердечника дросселя $V_{ж}$ можно пользоваться следующей приближенной формулой:

$$V_{ж} \geqslant \frac{LI_0^2}{1{,}2} 10^{-3} \; [см^3]; \qquad (35)$$

здесь L — в *гн*; I_0 — в *ма*.

Если объем сердечника взять много меньше величины, найденной из формулы (35), то будет иметь место сильное магнитное насыщение сердечника. Это ведет к значительному уменьшению магнитной проницаемости материала сердечника и увеличению расхода провода на изготовление данного дросселя.

Выбрав по таблице основных габаритов сердечников (стр. 33) тип сердечника, удовлетворяющий выражению (35), переходим к расчету обмотки дросселя.

Если дроссель работает при слабом подмагничивании постоянным током (что имеет место при $LI_0^2 \leqslant V_{ж} \cdot 10^{-4}$ где I_0 — в *а*), то зазор в его сердечнике не делается и необ-

ходимое количество витков его обмотки может быть найдено из выражения

$$w = 500\sqrt{\frac{l_{ж}}{Q_{ж}}}, \qquad (36)$$

где $l_{ж}$ — длина средней силовой линии в сердечнике в *см*;
$Q_{ж}$ — сечение сердечника в *см*^{2}.

Обе последние величины могут быть взяты из таблицы на стр. 33. Если же дроссель работает при значительном постоянном токе, когда необходимо делать в его сердечнике зазор, то число витков вычисляем по формуле

$$w = 10\frac{LI_0}{Q_{ж}}\left[1 + \sqrt{1 + 3\,000\frac{V_{ж}}{LI_0^2}}\right]. \qquad (37^*)$$

Для приближенных расчетов можно воспользоваться упрощенной формулой

$$w = \frac{45\,LI_0}{Q_{ж}} \qquad (37а)$$

Наивыгоднейшая длина зазора сердечника в *мм* может быть найдена из следующего приближенного соотношения:

$$l_{з} = \frac{wI_0}{8}10^{-5}. \qquad (38)$$

В последних формулах I_0 — выражено в *ма*; $l_{з}$ — в *мм*; $Q_{ж}$ — в *см*^{2}; $V_{ж}$ — в *см*^{3} и L — в *гн*.

Диаметр провода обмотки дросселя находят, как и при расчете трансформаторов, по заданному току, исходя из допустимой плотности тока. Для этого можно воспользоваться формулой (11) или (12).

Вследствие того, что при расчете дросселя задано его омическое сопротивление $r_{др}$, определяющее собой падение постоянного напряжения в дросселе, необходимо сделать проверку допустимости выбранного диаметра провода по заданному активному сопротивлению:

$$d \geqslant 0{,}015\sqrt{\frac{wl_0}{r_{др}}}, \qquad (39)$$

где l_0 — длина среднего витка в *см*.

Из двух значений d, найденных по формулам (11) или (12) и (39), выбирают наибольшее.

---

* Вывод этой формулы дан в приложении (стр. 38).

Выбрав диаметр провода, следует сделать проверку размещения обмотки дросселя в окне сердечника, подобно тому, как это делается при расчете трансформаторов.

Для ориентировочной проверки размещения обмотки дросселя в окне сердечника можно воспользоваться следующим соотношением

$$Q \geqslant \frac{q \cdot w}{100\, k_м}, \qquad (40)$$

где Q — площадь окна сердечника в *см*^{2};
q — площадь сечения провода в *мм*^{2};
w — число витков обмотки;
$k_м$ — коэффициент заполнения окна медью.

Считая, что площадь, занимаемая в окне сердечника каждым витком без учета изоляции, равна квадрату диаметра провода (по меди), получим:

$$q = d^2. \qquad (41)$$

Величину $k_м$ для дросселей можно брать большей, чем для трансформаторов, так как дроссели работают при меньших напряжениях и в них отсутствуют прокладки между обмотками.

Для провода ПЭ обычно принимают $k_м \approx 0{,}5$, для провода ПШД — $k_м \approx 0{,}25$.

Пример конструктивного расчета дросселя. Рассчитать дроссель фильтра выпрямителя, если дано: $L = 30$ *гн*; $I_0 = 60$ *ма*; $r_{др} \leqslant 500$ *ом*.

1. По формуле (35) находим минимально допустимый объем сердечника:

$$V_{ж} \geqslant \frac{LI_0^2}{2} \cdot 10^{-3} = \frac{30\,(60)^2 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot 10^{-3} = 54 \text{ см}^3.$$

2. Из таблицы (стр. 33) выберем тип сердечника Ш 19×20, для которого $V_{ж} = 57$ *см*^{3}; $l_{ж} = 15$ *см*; $Q_{ж} = 3{,}8$ *см*^{2}.

3. Вследствие того, что $LI_0^2 = 10{,}8 \cdot 10^{-2} > V_{ж} 10^{-4}$, ведем расчет дросселя с учетом постоянного подмагничивания сердечника. По формуле (37) находим число витков обмотки дросселя

$$w = 10 \frac{LI_0}{Q_{ж}} \left[1 + \sqrt{1 + 3\,000 \frac{V_{ж}}{LI_0^2}} \right] =$$

$$= 10 \frac{30 \cdot 60}{3{,}8} \left[1 + \sqrt{1 + 3\,000 \frac{57}{30 \cdot 60^2}} \right] = 12\,500 \text{ витков.}$$

4. Приняв $\Delta = 2{,}5$ *а/мм²*, по формуле (12) находим диаметр провода обмотки дросселя по плотности тока:

$$d = 0{,}7\sqrt{I_0} = 0{,}7\sqrt{0{,}06} = 0{,}17 \text{ мм.}$$

5. Минимально допустимый диаметр провода по заданному сопротивлению обмотки определяем по формуле (39):

$$d = 0{,}015\sqrt{\frac{w \cdot l_0}{r}} = 0{,}015\sqrt{\frac{12{,}5 \cdot 10^3 \cdot 13}{500}} = 0{,}27.$$

Выбираем из двух найденных величин d наибольшее значение $d = 0{,}27$.

6. Проверим размещение обмотки дросселя в окне сердечника по ориентировочной формуле (40), приняв в соответствии с формулой (41) $q = d^2$.

$$Q_o \geqslant \frac{qw}{100\,k_м} = \frac{0{,}27^2 \cdot 12{,}5 \cdot 10^3}{100 \cdot 0{,}5} = 18 \text{ см}^2.$$

Выбранный нами тип сердечника Ш 19×20 имеет площадь окна $Q_o = 7{,}8$ *см²*, следовательно, обмотка в окне не поместится. Это делает необходимым пересчет дросселя на больший габарит сердечника. Возьмем сердечник Ш 19×40, для которого согласно таблице (стр. 33): $Q_{эж} = 7{,}6$ *см²*; $Q_0 = 7{,}8$ *см²*; $V_{эж} = 114$ *см³*; $l_{эж} = 15$ *см*; $l_0 = 17$ *см*.

1. Найдем количество витков обмотки по формуле (37):

$$w = 10\frac{LI_0}{Q_{эж}}\left[1 + \sqrt{1 + 3\,000\frac{V_{эж}}{LI_0}}\right] =$$

$$= 10\frac{30 \cdot 60}{7{,}6} \cdot \left[1 + \sqrt{1 + 3\,000\frac{114}{30 \cdot 60^2}}\right] = 7\,200 \text{ витков.}$$

2. Диаметр провода, исходя из заданного сопротивлении 500 *ом*, определяем по формуле (39):

$$d = 0{,}015 \cdot \sqrt{\frac{w \cdot l_0}{r_{др}}} = 0{,}015\sqrt{\frac{7{,}2 \cdot 10^3 \cdot 13}{500}} = 0{,}21 \text{ мм.}$$

По плотности тока проверки не делаем, так как выше найдено, что при $\Delta = 2{,}5$ *а/мм³* необходимо иметь $d = 0{,}17$ *мм*.

Если применить провод с эмалевой изоляцией ПЭ, то при $d = 0{,}21$ его диаметр с изоляцией будет $d' = 0{,}25$ *мм*.

3. Проверим размещение обмотки в окне сердечника

$$Q = \frac{q \cdot w}{100\,k_м} = \frac{0{,}21^2 \cdot 7{,}2 \cdot 10^3}{100 \cdot 0{,}5} = 6{,}35 \text{ см}^2.$$

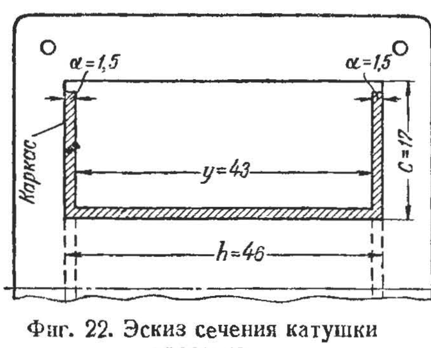
Фактическая площадь окна составляет 7,8 *см²*, следовательно, обмотка должна поместиться.

4. Из эскиза сечения катушки (фиг. 22) находим длину обмотки:

$$y = h - 2\alpha = 46 - 2\cdot 1{,}5 = 43 \text{ мм}.$$

5. Число витков в слое

$$w' = \frac{y}{d'} = \frac{43}{0{,}25} = 170.$$



Фиг. 22. Эскиз сечения катушки дросселя.

6. Количество слоев обмотки

$$n = \frac{w}{w'} = \frac{7\,200}{170} = 43.$$

7. Высота обмотки с учетом изоляционных прокладок (между слоями папиросная бумага толщиной $\beta = 0{,}05$ *мм*)

$$c_1 = h\,(d' + \beta) = 43\,(0{,}25 + 0{,}05) = 13 \text{ мм}.$$

8. Зазор между верхним слоем обмотки и сердечником

$$\delta = c - (c_1 + \alpha) = 17 - (13 + 1{,}5) = 2{,}5 \text{ мм},$$

т. е. вполне достаточный.

9. Находим полную длину зазора в сердечнике по формуле (38):

$$l_z = \frac{wI_0}{8}\,10^{-5} = \frac{7{,}2\cdot 10^3\cdot 60\cdot 10^{-5}}{8} = 0{,}54 \text{ мм}.$$

Толщина прокладки для получения такого зазора должна быть 0,27 *мм*, так как рассчитанный зазор конструктивно делится на два зазора: один между перемычкой сердечника и его средним стержнем и другой между перемычкой и крайними стержнями.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

ТАБЛИЦА ОСНОВНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ БРОНЕВЫХ СЕРДЕЧНИКОВ

Тип сердечника	a, см	b, см	c, см	h, см	$Q_{ж}$, см²	Q_{o}, см²	$Q_{ж} Q_{o}$, см⁴	l_{o}, см	$l_{ж}$, см	$V_{ж}$, см³
Ш-11	1,1	1,0	1,15	3,4	1,1	3,9	4,3	6,0	10	11
	1,1	2,0	1,15	3,4	2,2	3,9	8,6	9,0	10	22
Ш-15	1,5	1,5	1,35	2,4	2,25	3,24	7,3	10,0	11	25
	1,5	3,0	1,35	2,4	4,5	3,24	14,6	13,0	11	50
Ш-19	1,9	2,0	1,7	4,6	3,8	7,8	29,6	13,0	15	57
	1,9	4,0	1,7	4,6	7,6	7,8	59,2	17,0	15	114
Ш-20	2,0	2,0	1,0	3,0	4,0	3,0	12,0	13,0	12	48
(укороченный габарнт)	2,0	4,0	1,0	3,0	8,0	3,0	24,0	17,0	12	96
Ш-25	2,5	2,5	2,5	6,0	6,25	15,0	94,0	17,0	20	125
	2,5	5,0	2,5	6,0	12,5	15,0	188,0	22,0	20	250
Ш-30	3,0	3,0	1,5	4,5	9,0	6,75	61,0	18,0	18	162
	3,0	6,0	1,5	4,5	18,0	6,75	122,0	24,0	18	324
Ш-40	4,0	4,0	3,0	7,0	16,0	21,0	335,0	22,0	28	445
	4,0	8,0	3,0	7,0	32,0	21,0	670,0	30,0	28	990

ТАБЛИЦА ПРОВОДОВ

Приложение 2

Провод без изоляции				Диаметр провода в изоляции, мм					
Диаметр, мм	Сечение, мм²	Вес 1 000 м, кг	Сопротивление 1 000 м, ом	ПЭ	ПЭШО	ПШО	ПШД	ПБО	ПБД
0,05	0,00196	0,0175	9 290	0,06	—	—	—	—	—
0,06	0,00283	0,0252	6 440	0,07	—	—	—	—	—
0,07	0,00385	0,0343	4 730	0,08	—	—	—	—	—
0,08	0,00501	0,0448	3 630	0,09	—	—	—	—	—
0,09	0,00636	0,0567	2 860	0,10	—	—	—	—	—
0,1	0,00785	0,070	2 240	0,115	0,165	0,15	0,2	—	—
0,11	0,00950	0,085	1 850	0,125	0,175	0,16	0,21	—	—
0,12	0,0113	0,101	1 550	0,135	0,185	0,17	0,22	—	—

Провод без изоляции				Диаметр провода в изоляции, *мм*					
Диаметр, *мм*	Сечение, *мм²*	Вес 1 000 *м*, *кг*	Сопротивление 1 000 *м*, *ом*	ПЭ	ПЭШО	ПШО	ПШД	ПЕО	ПБД
0,13	0,0133	0,118	1 320	0,145	0,195	0,18	0,23	—	—
0,14	0,0154	0,137	1 140	0,155	0,205	0,19	0,24	—	—
0,15	0,0177	0,158	994	0,165	0,215	0,20	0,25	0,24	—
0,16	0,0201	0,179	873	0,175	0,225	0,21	0,26	0,25	—
0,17	0,0227	0,202	773	0,185	0,235	0,22	0,27	0,26	—
0,18	0,0254	0,227	688	0,195	0,245	0,23	0,28	0,27	—
0,19	0,0283	0,253	618	0,205	0,255	0,24	0,29	0,28	—
0,2	0,0314	0,280	558	0,215	0,28	0,26	0,32	0,29	—
0,21	0,0346	0,309	507	0,23	0,29	0,27	0,33	0,30	—
0,23	0,0415	0,370	423	0,25	0,31	0,29	0,35	0,32	—
0,25	0,0491	0,437	357	0,27	0,33	0,31	0,37	0,34	—
0,27	0,0572	0,510	306	0,295	0,36	0,33	0,39	0,38	—
0,29	0,0660	0,589	266	0,315	0,38	0,35	0,41	0,40	—
0,31	0,0755	0,673	233	0,34	0,4	0,37	0,43	0,42	—
0,33	0,0855	0,762	205	0,36	0,42	0,39	0,45	0,44	—
0,35	0,0962	0,857	182	0,38	0,44	0,41	0,47	0,46	—
0,38	0,1134	1,011	155	0,41	0,47	0,44	0,50	0,49	—
0,41	0,132	1,17	133	0,44	0,51	0,47	0,53	0,52	—
0,44	0,152	1,35	115	0,475	0,54	0,50	0,56	0,55	—
0,47	0,173	1,54	101	0,505	0,57	0,53	0,59	0,58	—
0,49	0,188	1,67	93	0,525	0,59	0,55	0,61	0,60	—
0,51	0,204	1,82	86	0,545	0,61	0,57	0,63	0,62	0,71
0,55	0,297	2,11	74	0,59	0,65	0,61	0,67	0,66	0,75
0,59	0,273	2,44	64	0,63	0,69	0,65	0,71	0,70	0,79
0,64	0,322	2,87	55	0,68	0,74	0,70	0,76	0,75	0,84
0,69	0,374	3,33	47	0,73	0,79	0,75	0,81	0,80	0,89
0,74	0,430	3,83	41	0,79	0,85	—	—	0,85	0,94
0,8	0,502	4,43	35	0,85	0,91	—	—	0,91	1,0
0,86	0,580	5,17	30	0,91	0,97	—	—	0,97	1,06
0,93	0,679	6,05	26	0,98	1,04	—	—	1,04	1,13
1,00	0,785	7,0	22	1,05	1,12	—	—	1,25	1,25
1,08	0,966	8,2	—	—	—	—	—	—	1,33
1,16	1,057	9,4	—	—	—	—	—	—	1,41
1,20	1,131	10,0	—	—	—	—	—	—	1,45
1,25	1,227	10,9	—	—	—	—	—	—	1,50
1,35	1,43	12,7	—	—	—	—	—	—	1,60
1,45	1,65	14,7	—	—	—	—	—	—	1,70
1,56	1,91	17,0	—	—	—	—	—	—	1,81
1,68	2,22	—	—	—	—	—	—	—	1,93
1,81	2,57	—	—	—	—	—	—	—	2,06
1,95	2,98	—	—	—	—	—	—	—	2,20
2,02	3,20	—	—	—	—	—	—	—	2,27
2,10	3,44	—	—	—	—	—	—	—	2,35
2,26	4,01	—	—	—	—	—	—	—	—
2,44	4,67	—	—	—	—	—	—	—	—

ВЫВОД ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНОГО ПАРАМЕТРА СЕРДЕЧНИКА ТРАНСФОРМАТОРА

Максимальная мощность, которую можно получить от трансформатора с сердечником данного типа, зависит от размеров последнего. Неверным, однако, является предположение, что мощность трансформатора определяется только площадью сечения сердечника $Q_{ж} = a \cdot b$ (фиг. 12). Совершенно равноправным параметром в этом отношении является площадь окна сердечника $Q_o = c \cdot h$. Справедливость этого утверждения очевидна из того, что, увеличивая площадь окна Q_o (при неизменной величине $Q_{ж}$), мы имеем возможность применять при намотке провод большего сечения или же увеличить число витков вторичных обмоток трансформатора, что равносильно увеличению его мощности.

Приводимая иногда формула для определения сечения сердечника по заданной мощности трансформатора

$$Q_{ж} = 1{,}2\sqrt{P_T}\ см^2 \tag{а}$$

не всегда дает верный результат.

Например, широко известный силовой трансформатор к приемнику СВД-9 имеет мощность 100 *вт*. Согласно формуле (а) сечение сердечника для такой мощности должно быть равно:

$$Q_{ж} = 1{,}2\sqrt{100} = 12\ см^2.$$

В то же время фактическое сечение сердечника этого трансформатора составляет 21 *см*².

Такое значительное несоответствие объясняется тем, что формула (а) не учитывает площади окна сердечника Q_o, от величины которой мощность трансформатора зависит в той же степени, как и от $Q_{ж}$.

Максимальная мощность, которая может быть получена с трансформатора, размещенного на данном сердечнике, определяется произведением сечения сердечника $Q_{ж}$ на сечение окна Q_o и не зависит от величины $Q_{ж}$ и Q_o, взятых в отдельности. Докажем это положение. При выводе будем исходить из общеизвестного выражения для индукции в сердечнике трансформатора:

$$B = \frac{E_1 \cdot 10^8}{4{,}44 \cdot f \cdot Q_{ж} \cdot k_{ж} \cdot w_1}, \tag{б}$$

где E_1 — э. д. с. первичной обмотки в *в*;
f — частота в *гц*;
$Q_{ж}$ — полное сечение сердечника в *см*²;
$k_{ж}$ — коэффициент заполнения сердечника, учитывающий неплотность сборки пластин и их изоляцию;
w_1 — число витков первичной обмотки.

В первом приближении можно считать, что напряжение, подведенное к первичной обмотке трансформатора U_1, равно э. д. с. этой обмот-

ки E_1, так как падение напряжения на омическом сопротивлении $I_1 r_1$ весьма мало; поэтому

$$U_1 = E_1 + I_1 \cdot r_1 \approx E_1.$$

Подставляя в выражение (б) $E_1 = U_1$; $f = 50$ *гц* и $k_{ж} = 0{,}9$, получим:

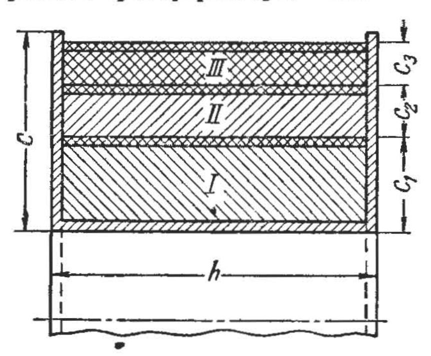
$$B = \frac{U_1 \cdot 10^6}{2Q_{ж} \cdot w_1}, \qquad \text{(в)}$$

откуда следует:

$$Q_{ж} = \frac{U_1 \cdot 10^6}{2B \cdot w_1}. \qquad \text{(г)}$$

Найдем далее площадь сечения окна Q_o, занимаемую обмотками трансформатора.

Точное определение площади, занимаемой обмотками, возможно лишь после окончания расчета трансформатора, когда известны количество



Фиг. 23. Катушка трансформатора в разрезе.

витков и диаметр провода для каждой из обмоток. Поэтому найдем приближенное значение площади обмоток, с тем чтобы в дальнейшем проверить размещение обмоток в окне сердечника.

Из фиг. 23 очевидно, что

$$Q_o = hc \approx hc_1 + hc_2 + hc_3 \approx Q_1 + Q_2 + Q_3, \qquad \text{(д)}$$

где Q_1, Q_2, Q_3, — площади, занимаемые отдельными обмотками с учетом всех прокладок и каркаса.

Если трансформатор содержит n обмоток, то выражение (д) принимает вид:

$$Q_o = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \ldots + Q_n. \qquad \text{(е)}$$

Выразим площадь, занимаемую первичной обмоткой трансформатора Q_1, следующим образом:

$$Q_1 = \frac{q_1 \cdot w_1}{10^2 k_м}, \qquad \text{(е)}$$

где q_1 — площадь сечения провода первичной обмотки в *мм²*;

$k_м$ — коэффициент заполнения окна трансформатора медью, учитывающий изоляцию провода, прокладки между обмотками, а также неплотность намотки.

В то же время известно:

$$q_1 = \frac{_1I}{\Delta},$$

где I_1 — ток первичной обмотки;

Δ — плотность тока.

Поэтому

$$Q_1 = \frac{I_1 w_1}{10^2 k_м \Delta} \qquad (ж)$$

или, подставив сюда значение w_1 из формулы (г), получим:

$$Q_1 = \frac{10^4}{B} \frac{I_1 U_1}{2Q_{ж} k_м \Delta}. \qquad (з)$$

Но $I_1 \cdot U = P_1$ — мощность первичной обмотки трансформатора в *ва*, следовательно:

$$Q_1 = \frac{10^4}{B} \frac{P_1 [ва]}{2Q_{ж} k_м \Delta}. \qquad (и)$$

Это выражение справедливо для любой из обмоток трансформатора, если в качестве P подставлять вольтамперы данной обмотки:

$$\left.\begin{aligned} Q_2 &= \frac{10^4}{B} \cdot \frac{P_2 [ва]}{2Q_{ж} k_м \Delta} \\ &\cdots\cdots\cdots \\ Q_n &= \frac{10^4}{B} \frac{P_n}{2Q_{ж} k_м \Delta}. \end{aligned}\right\} \qquad (к)$$

Величины $k_м$ и Δ для всех обмоток принимаем одинаковыми. Найдем теперь площадь окна Q_o, подставив полученный результат в выражение (f):

$$Q_o = Q_1 + Q_2 + \ldots + Q_n = \frac{10^4}{B} \frac{1}{2Q_{ж} k_м \Delta} (P_1 + P_2 + \ldots + P_n) \cdot \qquad (л)$$

Суммарная мощность вторичных обмоток $P_2 + P_3 + \ldots + P_n = P_{II}$ связана с мощностью первичной обмотки P_1 через к. п. д. трансформатора η_T:

$$P_1 = \frac{P_{II}}{\eta_T}.$$

Подставив последнее выражение в формулу (л), получим:

$$Q_o = \frac{10^4}{B} \frac{P_{II}(1+\eta_T)}{2\eta_T k_м \Delta Q_{ж}} \quad \text{(м)}$$

или окончательно:

$$Q_o Q_{ж} = \frac{10^4}{B} \cdot \frac{P_{II}(1+\eta_T)}{2\eta_T k_м \Delta}. \quad (10)$$

Итак, мы пришли к выражению, которое показывает, что при заданной мощности P_{II} мы должны иметь сердечник с произведением $Q_{ж}Q_o$ не менее определенной величины.

Приложение 4

ВЫВОД ФОРМУЛЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧИСЛА ВИТКОВ ДРОССЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО С ПОСТОЯННЫМ ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ

Индуктивность дросселя с сердечником из магнитного материала при наличии зазора в сердечнике может быть найдена по известной формуле

$$L = \frac{4\pi \cdot w^2 \cdot Q_{ж} \cdot k_{ж}}{\left(\frac{l_{ж}}{\mu} + l_з\right) \cdot 10^9}, \quad \text{(A)}$$

где L — индуктивность, *гн*;
w — число витков обмотки дросселя;
$Q_{ж}$ — сечение сердечника, *см*²;
$k_{ж}$ — коэффициент заполнения сердечника, учитывающий изоляцию пластин и неплотность сборки;
$l_{ж}$ — длина средней магнитной силовой линии в сердечнике, выраженная в *см*;
μ — динамическая проницаемость материала сердечника;
$l_з$ — длина зазора, *см*.

Эту формулу можно представить в таком виде:

$$L = \frac{4\pi\mu' Q_{ж} k_{ж} w^2}{l_{ж} \cdot 10^9}. \quad \text{(Б)}$$

Здесь μ' — эквивалентная магнитная проницаемость сердечника с учетом зазора

$$\mu' = \frac{\mu}{l_{ж} + \mu l_з}.$$

Однако приведенное выше выражение для L не позволяет непосредственно определить количество витков обмотки дросселя по заданной индуктивности, так как магнитная проницаемость и наивыгоднейшая величина зазора при работе дросселя с подмагничиванием зависят от числа витков w. Эти зависимости обычно задаются графически, что значительно затрудняет расчет.

Можно выразить магнитную проницаемость μ' и наивыгоднейшую длину зазора в сердечнике при помощи следующих эмпирических формул:

$$l_з = \frac{wI_0}{800};\qquad (В)$$

$$\mu' = \frac{4\,500}{15 + \frac{I_0 w}{l_{ж}}},\qquad (Г)$$

где I_0 — ток постоянного подмагничивания в *а*.

Подставив значение μ' из (*Г*) в (*В*), получим:

$$L = \frac{5,65\, w^2\, Q_{ж} \cdot k_{ж}}{(15\, l_{ж} + I_0 w) \cdot 10^5}.\qquad (Д)$$

Решив последнее выражение относительно w, получим:

$$w = \frac{L \cdot I_0 \cdot 10^5}{11,3 \cdot Q_{ж} \cdot k_{ж}} + \sqrt{\left(\frac{LI_0 \cdot 10^5}{11,3 \cdot Q_{ж} \cdot k_{ж}}\right)^2 + 2,65\, \frac{L\, l_{ж}}{Q_{ж} \cdot k_{ж}} \cdot 10^5}$$

или, преобразовав эту формулу и подставив в нее $k_{ж} \approx 0,88$ и I_0 в *ма*, найдем окончательно:

$$w = 10\, \frac{LI_0}{Q_{ж}} \left[1 + \sqrt{1 + 3\,000\, \frac{V_{ж}}{LI_0}}\right],\qquad (37)$$

где $V_{ж} = Q_{ж} \cdot l_{ж}$ — объем сердечника в $см^3$.

Полученная формула позволяет найти количество витков обмотки дросселя по заданной индуктивности L, току подмагничивания I_0 и размерам сердечника $Q_{ж}$ и $V_{ж}$.

СОДЕРЖАНИЕ

ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
24	Формулы (27), (27'), (28)	$4 \cdot 10^4$	$40 \cdot 10^4$
27	8 сверху	27,5 *гн*	2,75 *гн*
27	12	0,187	0,0187
23	Формула (35)	1 : 2	$1 \div 2$

Кризе С. Н. — Расчет маломощных силовых трансформаторов и дросселей фильтров

ТАБЛИЦА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ НА ВХОДЕ ФИЛЬТРА ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Схема выпрямителя	Частота пульсаций, *гц*	Схема фильтра	Амплитуды пульсаций на входе фильтра
Однополупериодная	50	Конденсаторный вход (фильтр начинается с емкости)	$\Delta u_0 \approx U_0 \frac{500}{C_1 R_i}$
Двухполупериодная	100	Конденсаторный вход	$\Delta u_0 \approx U_0 \frac{400}{C_1 R_i}$
		Дроссельный вход	$\Delta u_0 = 0{,}67\ U_0$
Двухполупериодная схема удвоения напряжения (схема Латура)	100	Конденсаторный вход	$\Delta u_0 \approx U_0 \frac{400}{C_1 R_i}$

Примечание. C_1 — емкость входного конденсатора фильтра, *мкф*;
R_i — сопротивление кенотрона, *ом*.

РЕЖИМЫ РАБОТЫ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ СХЕМ

Схема выпрямителя	Схема фильтра	Выпрямленное напряжение	Средний выпрямленный ток	Эффективное напряжение вторичной обмотки трансформатора	Эффективный ток вторичной обмотки трансформатора	Максимальный импульс анодного тока кенотрона	Максимальная амплитуда обратного напряжения на кенотроне
Однополупериодная	Конденсаторный вход (фильтр начинается с емкости)	U_0	I_0	$U_2 = (1 \div 1{,}2)\ U_0$	$I_2 = (2 \div 2{,}2) \cdot I_0$	$I_m = (5 \div 6) I_0$	$U_{обр} \approx 3U_0$
Двухполупериодная	Конденсаторный вход	U_0	I_0	$U_2 = (2 \div 2{,}2)\ U_0$	$I_2 = (1 \div 1{,}2)\ I_0$	$I_m = (3 \div 3{,}5)\ I_0$	$U_{обр} \approx 3U_0$
	Дроссельный вход	U_0	I_0	$U_2 = (2{,}2 \div 2{,}5)\ U_0$	$I_2 = 0{,}71 \cdot I_0$	$I_m = I_0$	$U_{обр} \approx 3{,}2U_0$
Двухполупериодная схема удвоения напряжения (схема Латура)	Конденсаторный вход	U_0	I_0	$U_2 = (0{,}5 \div 0{,}6)\ U_0$	$I_2 = (3 \div 3{,}5) I_0$	—	$U_{обр} \approx 1{,}5U_0$

Цена 1 р. 50 к.